

На правах рукописи

**КУЗЬМИН Вячеслав Владимирович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ  $^3\text{He}$  В АЭРОГЕЛЯХ МЕТОДОМ ЯМР**

Специальность 01.04.07 - физика конденсированного  
состояния

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико - математических наук

**Казань 2011**

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники и радиоспектроскопии  
ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель: - доктор физико - математических наук,  
профессор  
**М. С. Тагиров**

Официальные оппоненты:

- доктор физико - математических наук,  
член-корреспондент РАН  
**В. В. Дмитриев**

- доктор физико - математических наук,  
профессор  
**В. Д. Скирда**

Ведущая организация: - Казанский физико-технический институт  
им. Е. К. Завойского КазНЦ РАН

Защита диссертации состоится 24 ноября 2011 г. в 14 часов 40 минут на заседании диссертационного совета Д 212.081.15 при Казанском (Приволжском) федеральном университете по адресу: 420008, г.Казань, ул.Кремлевская, 16а.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке имени Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета.

Автореферат разослан            октября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д. ф.-м.н., профессор



М.В.Ерёмин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Исследование процессов, происходящих на границе твердого тела и жидкого  $^3\text{He}$ , является актуальной задачей современной физики низких температур. Впервые необычные эффекты на границе твердого тела и  $^3\text{He}$  были наблюдаемы Абелем – было обнаружено аномально малое тепловое сопротивление (сопротивление Капицы) на границе разделов жидкого  $^3\text{He}$  и церий магниевого нитрата<sup>1,2</sup>. Данные работы послужили толчком к исследованию процессов происходящих на границе разделов твердое тело – жидкий  $^3\text{He}$ . В качестве субстратов для исследований использовались различные пористые среды и кристаллические порошки. В ходе этих исследований были изучены магнитные свойства адсорбированных слоев  $^3\text{He}$  на поверхности твердого тела и выявлены причины выше упомянутого аномально малого теплового сопротивления на границе разделов твердое тело – жидкий  $^3\text{He}$ , а именно была обнаружена возможность существования магнитных взаимодействий между спинами (электронными или ядерными) некоторых твердых тел и жидкого  $^3\text{He}$ . Более того данные взаимодействия возможно использовать для динамической поляризации ядерных спинов  $^3\text{He}$  посредством накачки спинов твердого тела<sup>3</sup>.

Аэрогели, в которых существуют парамагнитные центры (например, индуцированные рентгеновским излучением) могут являться модельными системами для исследования процессов взаимодействия спинов  $^3\text{He}$  со спинами твердого тела. Данное направление исследований является интересным с точки зрения решения проблемы динамической поляризации жидкого  $^3\text{He}$  с помощью твердотельных субстратов.

Исследования жидкого  $^3\text{He}$  в ограниченной геометрии твердотельных нанопор и аэрогелей представляют большой интерес, как с точки зрения наноскопической

---

<sup>1</sup> Abel, W. R. Low-temperature heat capacity of liquid  $^3\text{He}$  / W. R. Abel, A. C. Anderson, W. C. Black, J. C. Wheatley // Phys. Rev. Lett. – 1965. – V. 15. – P. 875-878..

<sup>2</sup> Abel, W. R. Thermal equilibrium between liquid  $^3\text{He}$  and powdered cerium magnesium nitrate at very low temperatures/ W. R. Abel, A. C. Anderson, W. C. Black, J. C. Wheatley // Phys. Rev. Lett. – 1966. – V. 16. – P. 273-275.

<sup>3</sup> Schuhl, A. Production of enhanced liquid  $^3\text{He}$  magnetization by dynamic nuclear polarization / Schuhl A., Maegawa S., Meisel M.W., Chapellier M. // Phys.Rev. Lett. -1985. - V.54. - P.1952-1955.

физики квантовой Ферми жидкости и механизмов влияния беспорядка на свойства Ферми жидкости, так и с точки зрения характеристики свойств поверхности твердотельных субстратов.

К настоящему времени опубликовано достаточно большое количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованиям свойств сверхтекучего  $^3\text{He}$  в аэрогелях при сверхнизких температурах, однако поведение невырожденной ферми жидкости  $^3\text{He}$  в аэрогеле (температура Ферми жидкого  $^3\text{He}$  составляет порядка 0,5 K) остается плохо изученным.

**Целью** данной работы являлось исследование процессов ядерной магнитной релаксации  $^3\text{He}$  в различных его фазах (адсорбированной, газообразной и жидкой), находящегося в контакте с аэрогелями при температурах выше температуры Ферми жидкого  $^3\text{He}$ .

#### **Научная новизна работы:**

1. Впервые методами импульсного ЯМР исследована спиновая кинетика  $^3\text{He}$  в аэрогелях выше температуры Ферми. Можно отметить принципиальную новизну проведенных исследований – ранее все исследования подобных систем проводились при сверхнизких температурах.
2. Предложена модель релаксации  $^3\text{He}$  в адсорбированном слое на поверхности аэрогелей, учитывающая неоднородный потенциал адсорбции  $^3\text{He}$  в аэрогеле.
3. Предложена ЯМР методика исследования процессов термализации адсорбированных слоев  $^3\text{He}$  на поверхности аэрогелей при низких температурах, с помощью которой были определены характеристические времена установления термодинамического равновесия в системе адсорбированный  $^3\text{He}$  – аэрогель.
4. Обнаружено сильное влияние неоднородного потенциала адсорбции  $^3\text{He}$  в аэрогелях на спиновую кинетику  $^3\text{He}$ , проявляющееся в сильной зависимости времени продольной релаксации ( $T_1$ ) адсорбированного  $^3\text{He}$  от условий, при которых происходила адсорбция.
5. Впервые экспериментально получены распределения энергий адсорбции  $^3\text{He}$  в двух различных типах аэрогелей.

## **Практическая ценность работы**

Результаты данных исследований могут быть применены при дальнейших исследованиях магнитных свойств  $^3\text{He}$  находящегося в контакте с различными нанопористыми средами, поскольку большинство полученных экспериментальных закономерностей, скорее всего являются универсальными при исследовании  $^3\text{He}$  в нанопористых средах. Так, вывод о ядерной магнитной релаксации жидкого  $^3\text{He}$  через адсорбированный слой может быть использован в гелиевой ( $^3\text{He}$ ) ЯМР порометрии для характеристики размеров пор. Разработанная ЯМР методика исследования процессов установления термодинамического равновесия в адсорбированных слоях  $^3\text{He}$  в высокопористых средах также может иметь практическое применение.

## **Автор защищает:**

1. Результаты экспериментальных исследований методами импульсного ядерного магнитного резонанса при температурах 1,5-4,2 К спиновой кинетики жидкого, газообразного и адсорбированного  $^3\text{He}$  в аэрогелях.
2. Модель ядерной магнитной релаксации жидкого и газообразного  $^3\text{He}$  в аэрогелях.
3. Модель релаксации в адсорбированном слое  $^3\text{He}$ , учитывающую неоднородную поверхность аэрогелей и позволяющую качественно объяснить зависимость времени ядерной магнитной релаксации ( $T_1$ ) от частоты.
4. ЯМР методику исследования процессов установления термодинамического равновесия в адсорбированных слоях  $^3\text{He}$  в высокопористых средах, в которой наряду с измерением времен релаксации  $T_1$ ,  $T_2$ , амплитуды сигнала ЯМР  $^3\text{He}$  измеряются их зависимости от времени после начала конденсации.
5. Обнаружение метастабильных состояний у адсорбированных слоев  $^3\text{He}$  на поверхности аэрогелей.
6. Результаты экспериментальных исследований процессов адсорбции  $^3\text{He}$  в аэрогелях прямыми термодинамическими методами, в ходе которых были определены средние значения в распределениях энергий адсорбции атомов  $^3\text{He}$  и интервал энергий адсорбции атомов  $^3\text{He}$ , через которые происходит ядерная магнитная релаксация.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на различных международных, всероссийских, региональных конференциях, а также на итоговых конференциях Казанского (Приволжского) федерального университета.

### **Публикация результатов исследований**

Основные результаты диссертационной работы отражены в 3 статьях в ведущих международных научных журналах (в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертаций) и в 10 трудах и тезисах всероссийских и международных конференций.

### **Личное участие автора в получении научных результатов**

Все представленные в данной диссертации экспериментальные данные были получены в НИЛ МРС и КЭ им. С.А. Альтшулера Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета. Непосредственно автором были проведены все экспериментальные измерения ЯМР релаксации  $^3\text{He}$  в аэрогелях, проведены эксперименты по определению энергий адсорбции  $^3\text{He}$  в аэрогелях, проведены расчеты и моделирование, позволившие получить распределения энергий адсорбции  $^3\text{He}$  в аэрогелях из экспериментальных данных.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 104 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка и 1 таблицу. Список используемой литературы содержит 77 наименований.

В **первой главе** описаны использованные образцы аэрогелей и основное используемое оборудование: импульсный спектрометр ЯМР, вакуумная система и газовый пульт  $^3\text{He}$ .

Исследованные образцы (рисунок 1) представляли собой нитевидный аэрогель (пористость 95%) и мелкодисперсный порошок аэрогеля (производство фирмы EMP-SAP, Южная Корея).

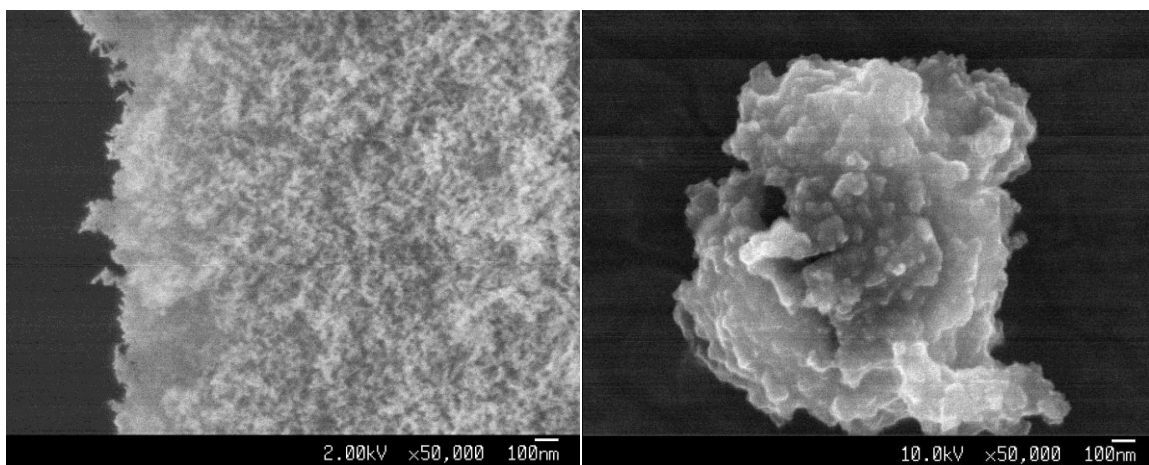


Рисунок 1 - Фотографии аэрогелей, полученные на электронном сканирующем микроскопе JEOL JSM-6330F. Слева – нитевидный аэрогель, справа – порошкообразный (показана одна частица).

Во **второй** главе приведен обзор работ по исследованию релаксации  $^3\text{He}$  в различных пористых средах и магнитных связей  $^3\text{He}$  с ядерными и электронными спинами твердых тел, описаны основные свойства аэрогелей и свойства  $^3\text{He}$ , находящегося в контакте с ними. Представлены результаты экспериментальных исследований ядерной магнитной релаксации  $^3\text{He}$  в различных его фазах (агрегатных состояниях) в нитевидном и порошкообразном аэрогелях.

Во всех случаях было обнаружено, что время релаксации  $T_1$  приблизительно линейно зависят от ларморовской частоты ЯМР  $^3\text{He}$ , в то время как  $T_2$  слабо зависит от частоты (рисунок 2). Подобные же зависимости были обнаружены и в порошкообразном аэрогеле.

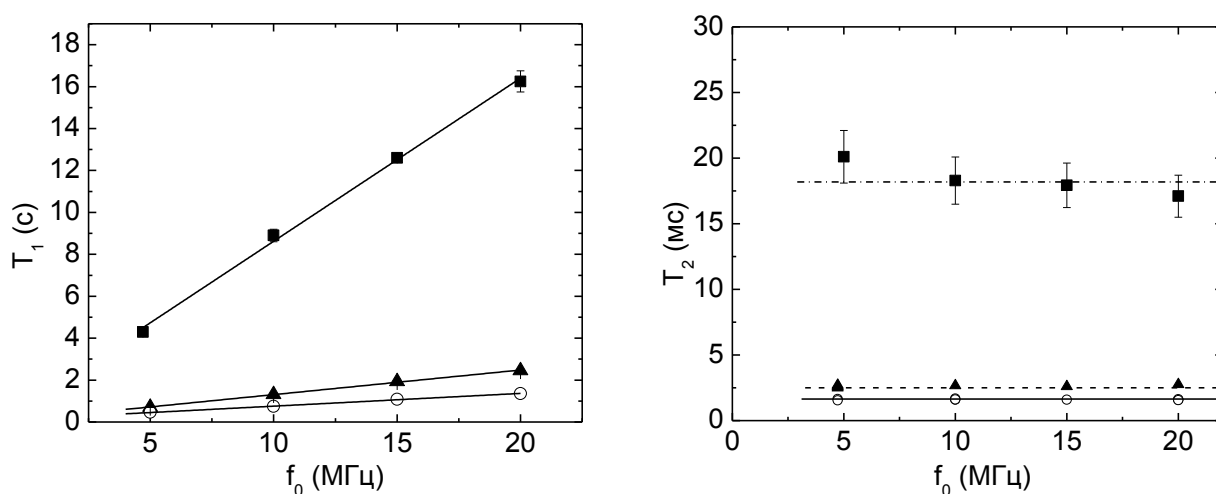


Рисунок 2- Частотные зависимости  $T_1$  и  $T_2$  ядер  $^3\text{He}$  в нитевидном аэрогеле:

○ – адсорбированный  $^3\text{He}$ , ▲ – адсорбированный и газообразный  $^3\text{He}$  (33 мбар),

■ – адсорбированный и жидкий  $^3\text{He}$ ,  $T=1,5$  К.

Измерения времен  $T_1$  и  $T_2$  ядер  $^3\text{He}$  при наличии газообразной и жидкой фазы в ячейке в зависимости от общего количества конденсированных атомов  $^3\text{He}$  в нитевидном аэрогеле (рисунок 3) показали, что времена магнитной релаксации прямо пропорциональны соответствующим временам релаксации в адсорбированном слое и соотношению теплоемкости всей ядерной спиновой системы к теплоемкости спинов адсорбированного слоя, т.е.:

$$T_1 = T_{1S} \cdot N_0 / N_S, \quad (1)$$

где  $T_1$ ,  $N_0$  – время восстановления продольной намагниченности и число спинов во всей системе,  $T_{1S}$ ,  $N_S$  – время восстановления продольной намагниченности и число спинов и в адсорбированном слое, соответственно, и, аналогично:

$$T_2 = T_{2S} \cdot N_0 / N_S, \quad (2)$$

где  $T_2$  – время спада поперечной намагниченности во всей системе,  $T_{2S}$  – время спада поперечной намагниченности в адсорбированном слое, соответственно.

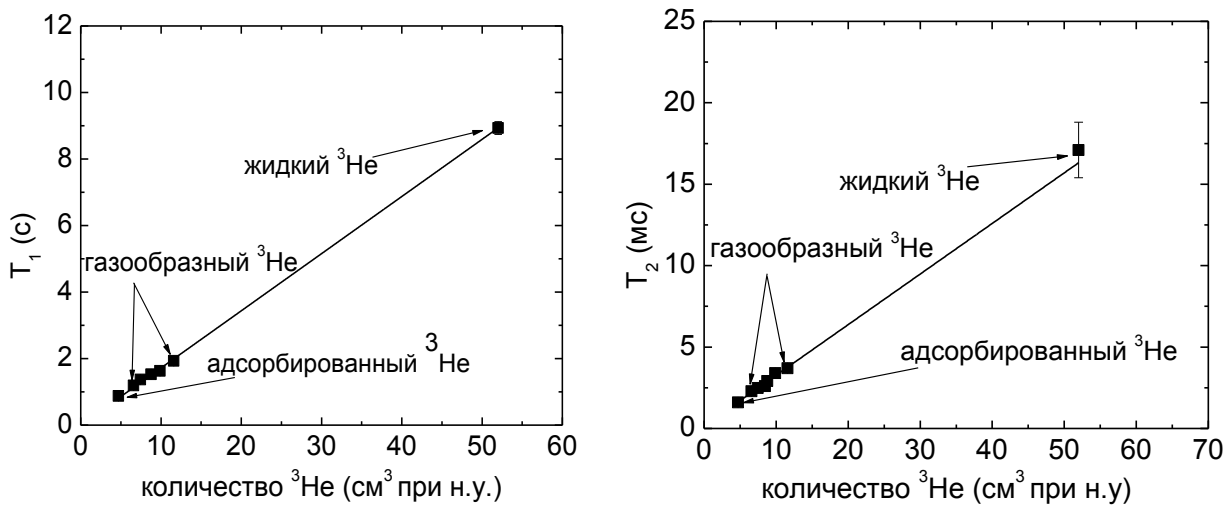


Рисунок 3- Зависимость времен  $T_1$  и  $T_2$  от количества  $^3\text{He}$  в нитевидном аэрогеле (объем образца  $0,16 \text{ cm}^3$ ),  $f_0=10 \text{ МГц}$ ,  $T=1,5 \text{ К}$ .

Для объяснения частотных зависимостей времен  $T_1$  в адсорбированном  $^3\text{He}$  на поверхности нитевидного аэрогеля была предложена модель релаксации, учитывающая его нитевидную структуру и соответствующий ей неоднородный потенциал адсорбции  $^3\text{He}$  (рисунок 4).



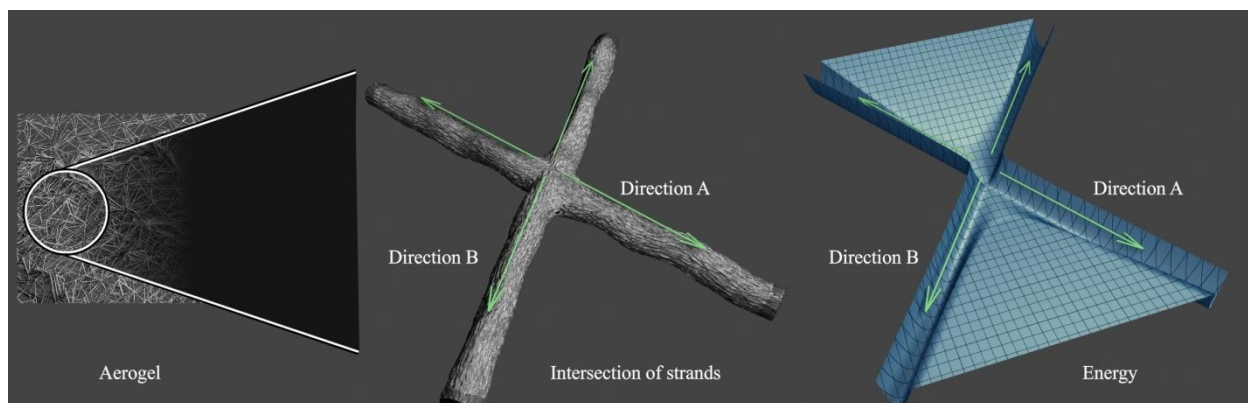


Рисунок 4 - Нитевидная структура силикатного аэрогеля (слева), две пересекающиеся нити (в центре) и изменение глубины потенциальной ямы для адсорбированных атомов  $^3\text{He}$  вблизи узла (области пересечения нитей аэрогеля) (справа).

Если на плоской (двумерной) поверхности твердотельного субстрата потенциал адсорбции и, следовательно, потенциальная яма, в которой находятся атомы адсорбированной пленки  $^3\text{He}$ , постоянны вдоль всей поверхности, то в случае нитевидной структуры в областях, близких к пересечению нитей (около узлов структуры, на котором для простоты показано пересечение только двух нитей), глубина потенциальной ямы непрерывно меняется, а следовательно, практически непрерывным образом меняются уровни энергии адсорбированных атомов  $^3\text{He}$ . Д.А. Таюрским была высказана идея о том, что в области около узла всегда можно найти два поверхностных состояния атомов  $^3\text{He}$ , энергия перехода между которыми в точности равна энергии переворота ядерного спина. При этом очевидно, что с увеличением резонансной частоты (приложенного магнитного поля) эти два поверхностных состояния пространственно удаляются и вероятность перехода между ними уменьшается. Уменьшается, соответственно, и скорость продольной релаксации. Таким образом, в данной модели термостатом для ядерной магнитной релаксации  $^3\text{He}$  является энергетический резервуар движений в неоднородном потенциале адсорбции в аэрогеле.

В **третьей главе** описаны эксперименты, в которых были исследованы процессы термализации адсорбированных слоев и метастабильные состояния  $^3\text{He}$  в аэрогелях с различной структурой.

Известно, что аэрогели являются одними из лучших теплоизоляторов, поэтому при экспериментальном исследовании процессов ядерной магнитной релаксации в адсорбированном слое важным является вопрос о том, как быстро происходит

термализация и установление термодинамического равновесия в адсорбированных слоях гелия. Для ответа на этот вопрос были проведены эксперименты, в которых изучалась динамика следующих параметров: давления, времен  $T_1$  и  $T_2$ , а также амплитуды сигнала ЯМР после запуска  $^3\text{He}$  в экспериментальную ячейку с аэрогелем. На рисунке 5 представлены зависимости  $T_2$  и амплитуды сигнала ЯМР адсорбированного  $^3\text{He}$  от времени, прошедшего с момента запуска гелия в ампулу с образцом. Самое большое характеристическое время установления равновесия было получено из измерения амплитуды сигнала ЯМР и составило примерно 26 мин для образца нитевидного аэрогеля. Следует отметить, что все экспериментальные данные, представленные на рисунке 5 описывают глобальный процесс установления термодинамического равновесия в системе “ $^3\text{He}$  – аэрогель” и являются проявлением различных физических процессов, происходящих в системе (адсорбция, перераспределение атомов в адсорбированном слое, термализация слоя и матрицы аэрогеля, общее выравнивание температуры системы с температурой ванны  $^4\text{He}$ ).

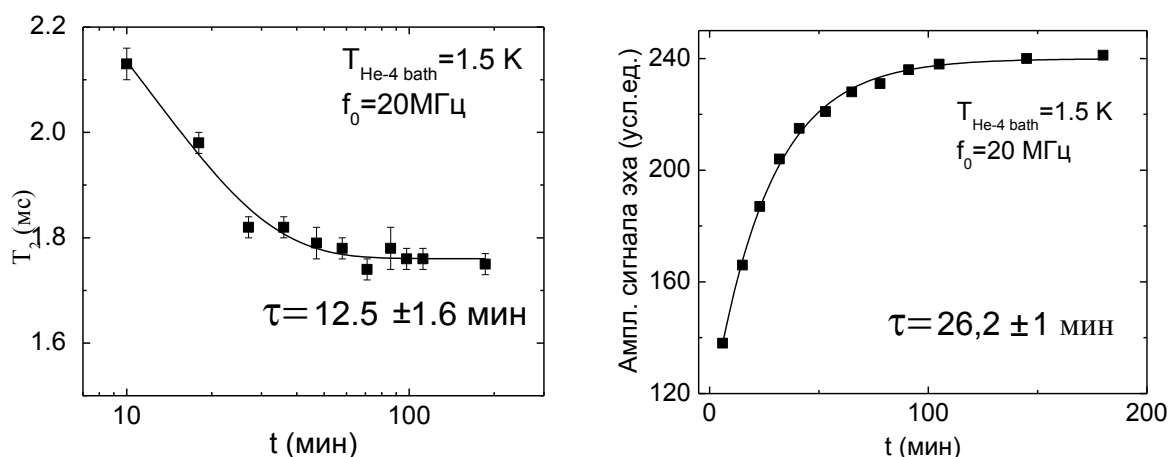


Рисунок 5— Зависимости времен поперечной релаксации  $T_2$  и амплитуды сигнала ЯМР  $^3\text{He}$  в аэрогеле от времени прошедшего с начала конденсации.

При измерениях температурных зависимостей времен релаксации адсорбированного слоя  $^3\text{He}$  малой плотности было обнаружены эффекты метастабильных состояний. Это проявлялось в зависимости времени  $T_1$  адсорбированного слоя  $^3\text{He}$  от условий при которых этот слой был сконденсирован, а именно от температуры конденсации (рисунок 6).

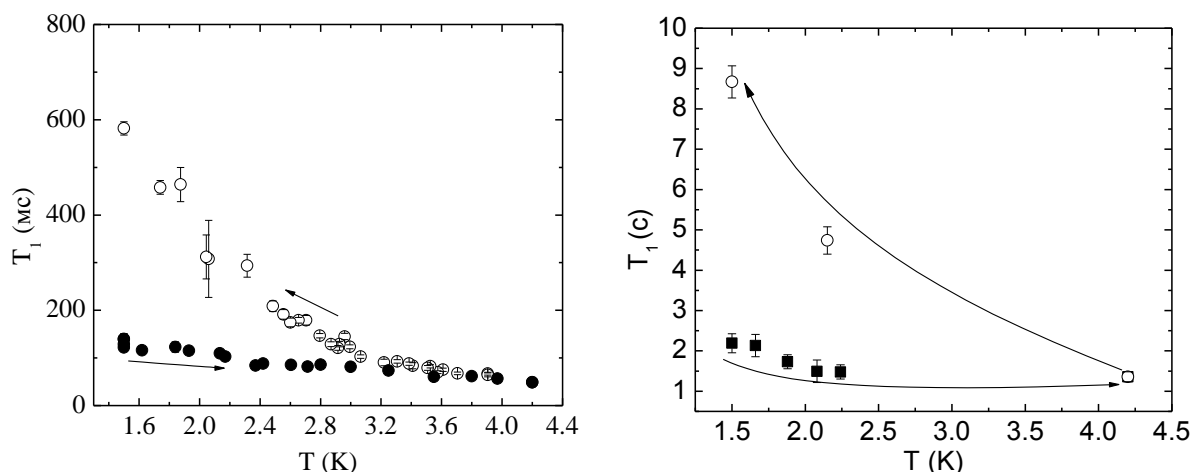


Рисунок 6 – Температурные зависимости времен  $T_1$  адсорбированного  $^3\text{He}$  на поверхности порошкового аэрогеля (слева) и нитевидного аэрогелей (справа). Стрелками указано направление изменения температуры (20-ти процентное заполнение адсорбированного слоя).

Данный эффект является проявлением неоднородного потенциала адсорбции  $^3\text{He}$  в аэрогелях. Так, при конденсации при температуре 1,5 К  $^3\text{He}$  располагается равномерно во все потенциальные ямы на поверхности (метастабильное состояние), а при конденсации при температуре 4,2 К адсорбция осуществляется преимущественно в самых глубоких потенциальных ямах. Наличие сильной температурной зависимости времен ядерной магнитной релаксации  $T_1$  адсорбированного на поверхности аэрогеля  $^3\text{He}$  свидетельствует о том, что при неполном заполнении поверхности адсорбированным слоем помимо квантового движения существенную роль в релаксации начинают играть тепловые движения  $^3\text{He}$ . Можно отметить, что в случае полного заполнения адсорбированного слоя подобных метастабильных состояний не наблюдается.

В **четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований процессов адсорбции  $^3\text{He}$  в аэрогелях прямыми термодинамическими методами, в ходе которых были определены значения энергий адсорбции  $^3\text{He}$ . Определен интервал энергий адсорбции атомов  $^3\text{He}$  в слое, через которые происходит ядерная магнитная релаксация жидкого или газообразного  $^3\text{He}$ . Целью данных исследований являлось подтверждение гипотезы о существовании распределения энергий

адсорбции  $^3\text{He}$  в аэрогелях, на основе которой была предложена модель релаксации в адсорбированных слоях  $^3\text{He}$ .

Для определения энергий адсорбции  $^3\text{He}$  в аэрогелях были проведены прямые термодинамические измерения температурных зависимостей давления газообразного гелия над поверхностью аэрогеля по следующей методике. При комнатной температуре в замкнутую систему, состоящую из “холодной” части (тонкий капилляр и экспериментальная ячейка с аэрогелем в криостате) и “теплой” части (внешний медный капилляр и дозирующий объем с датчиком давления), напускался газообразный  $^3\text{He}$  в количестве, необходимом для полного заполнения адсорбированного слоя. Постепенное охлаждение холодной части системы, находящейся в криостате, с помощью гелиевой продувочной установки приводило к уменьшению давления в системе как за счет понижения температуры газообразного  $^3\text{He}$  в экспериментальной ячейке, так и за счет адсорбции  $^3\text{He}$  на поверхности аэрогеля. Далее с учетом перераспределения газообразного гелия между “теплой” и “холодной” частью системы  $^3\text{He}$  были получены зависимости количества адсорбированных атомов от температуры (рисунок 7).

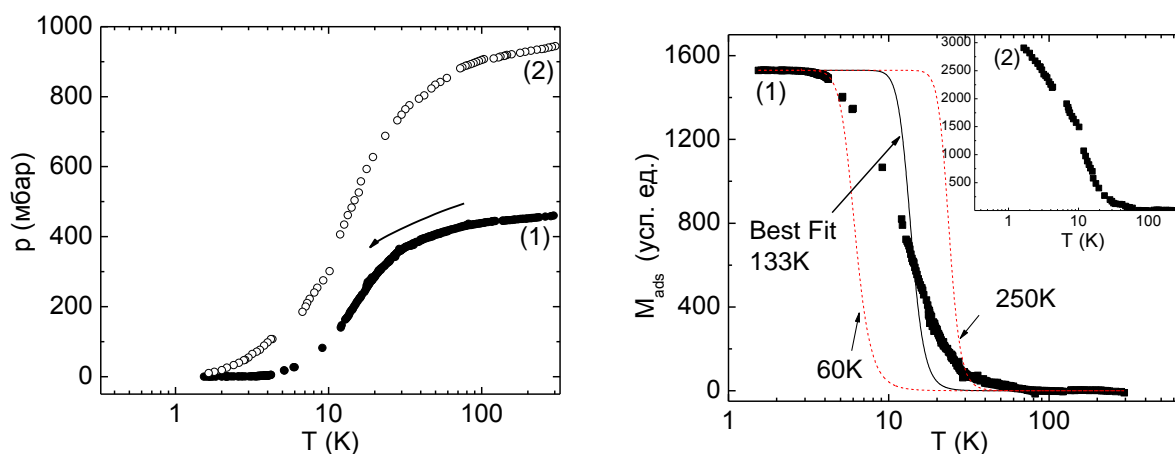


Рисунок 7 -Зависимости давления в системе и количества адсорбированных атомов от температуры в порошкообразном аэрогеле. Зависимости  $p(T)$  и  $M_{ads}(T)$  соответствуют в случае (1) -  $V(^3\text{He})=12 \text{ см}^3$  при н.у. в системе (количество  $^3\text{He}$  необходимое для заполнения полностью заполненного слоя), в случае (2) -  $V(^3\text{He})=24 \text{ см}^3$  при н.у. Точками обозначены экспериментальные данные, линиями – расчет на основе модели Лэнгмюра (см. в тексте).

Анализ полученных результатов адсорбции при полностью заполненном слое  $^3\text{He}$  в системе был проведен в рамках модели адсорбции Лэнгмюра для монослойной адсорбции<sup>4</sup>:

$$\Theta = p/(p^* + p), \quad (3)$$

где  $\Theta$  – степень заполнения монослоя,  $p^*$  вычисляется по формуле:

$$p^* = \alpha T^{5/2} / \langle \exp[-H^S/kT] \rangle, \quad (4)$$

В случае низких температур можем написать :

$$\langle \exp[-H^S/kT] \rangle \approx \exp[-E_{\text{адс}}/kT], \quad (5)$$

где  $E_{\text{адс}}$  – энергия адсорбции,  $T$  – температура,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\alpha$  – постоянная.

Однако, как видно из рисунка 7 экспериментальная кривая не описывается процессом типа (3) с единственной энергией адсорбции, следовательно, существует распределение энергий адсорбции  $^3\text{He}$  в аэрогелях и как видно из данного же рисунка распределение лежит примерно в пределах 60-250 К.

Одновременно в этих экспериментах были проведены измерения времен релаксации  $T_1$  ядер  $^3\text{He}$  в диапазоне температур 1,5 - 4,2 К (рисунок 8). Как видно из температурных зависимостей времен  $T_1$ , приведенных на рисунке 8, весь адсорбированный гелий, который находится поверх “релаксирующего слоя” ( $V_I = 12 \text{ см}^3$  (при н.у.)) является “нагрузкой” в релаксации по отношению к максимальному адсорбционному слою, т.е. релаксация подчиняется модели Хэммела и Ричардсона<sup>5</sup>:

$$T_1 = T_{1s} \cdot N_2(T) / N_I, \quad (6)$$

где  $T_{1s}$  – время релаксации в адсорбированном “релаксирующем” слое, слабо зависящее от температуры,  $N_2(T)$  – количество молекул гелия в ячейке, которое зависит от температуры, вследствие перераспределения газа в системе,  $N_I = 12 \text{ см}^3$  – количество молекул гелия на поверхности аэрогеля, через который происходит релаксация. Теоретическая кривая (6) изображена на рисунке 8 сплошной линией.

<sup>4</sup> Steele, W.A. Thermodynamic properties of adsorbed helium / W.A. Steele// J. Low. Temp. Phys. – 1970. – V. 3 – P. 257-280.

<sup>5</sup> Hammel, P.C. Relaxation of nuclear magnetization of liquid  $^3\text{He}$  in confined geometries / P.C. Hammel, R.C. Richardson// Phys. Rev. Lett. – 1984. – V.52. – P.1441-1444.

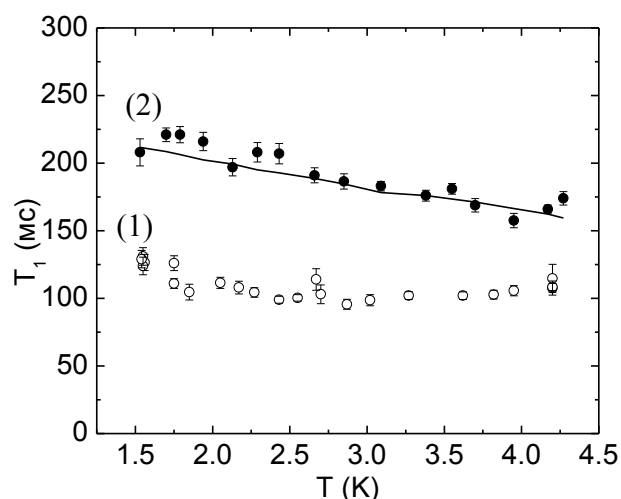


Рисунок 8 – Температурные зависимости времен ядерной магнитной релаксации  $T_1$  ядер  $^3\text{He}$  в порошкообразном аэрогеле:  $\circ$  –  $12 \text{ см}^3$  при н.у – количество  $^3\text{He}$  необходимое для заполнения полностью заполненного слоя,  $\bullet$  –  $24 \text{ см}^3$  газообразного  $^3\text{He}$  при н.у. Сплошная линия – модель (6) – см. в тексте.

Таким образом, ядерная магнитная релаксация ядерных спинов  $^3\text{He}$  с энергиями адсорбции менее 60 К происходит через адсорбированный слой, с энергиями адсорбции атомов  $^3\text{He}$  в котором примерно 60-250 К.

Чтобы получить распределения энергий в аэрогелях, была проведена аппроксимация суммой 20 процессов (3) с различными энергиями адсорбции для обоих типов аэрогелей, которая хорошо описывает зависимости количества адсорбированных атомов от температуры (рисунок 7 – для порошкообразного аэрогеля, экспериментальные данные для нитевидного аэрогеля не приведены в данном автореферате). В результате аппроксимаций для обоих видов аэрогелей были получены модельные распределения энергий адсорбции, состоящие из дискретных наборов энергий (рисунок 9). Как видно из данного рисунка, в обоих типах аэрогелей, несмотря на различную структуру, распределения энергий адсорбции практически совпадают. Полученные распределения являются довольно широкими, и интересующие диапазоны распределения энергий адсорбции ( $E_{\text{адс}} > 60 \text{ К}$ ; спины атомов  $^3\text{He}$ , имеющие энергии адсорбции меньше 60 К, релаксируют через адсорбированный слой с большими энергиями адсорбции) хорошо описываются экспоненциальной функцией вида:

$$n = n_0 \cdot \exp(-E_{\text{адс}}/E_w). \quad (7)$$

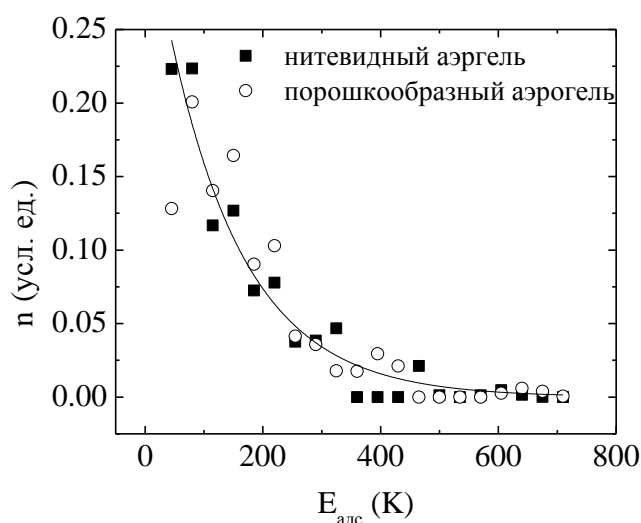


Рисунок 9 – Распределения энергий адсорбции  $^3\text{He}$ , состоящих из дискретных наборов из 20 энергий в двух типах аэрогелей. Сплошной линией показана аппроксимация моделью (7) распределения энергии адсорбции для нитевидного аэрогеля (см. в тексте).

Параметр  $E_w$ , полученный из аппроксимации, оказался равным  $130 \pm 11 \text{ K}$  для нитевидного и  $136 \pm 12 \text{ K}$  для порошкообразного аэрогелей. Средняя энергия адсорбции при этом совпадает с данным параметром  $E_w$ . Такое совпадение распределений энергий адсорбции в двух видах аэрогелей является удивительным, учитывая структурные различия этих аэрогелей, наблюдаемые на фотографиях, сделанных на сканирующем электронном микроскопе (рисунок 1).

Во второй главе данной диссертации была предложена модель ядерной продольной магнитной релаксации адсорбированного  $^3\text{He}$  на поверхности аэрогелей при низких температурах, основанная на предположении о неоднородном потенциале адсорбции  $^3\text{He}$  в аэрогелях. Проведенные эксперименты по определению энергий адсорбции подтверждают гипотезу о неоднородном потенциале адсорбции в аэрогелях, вложенную в модель релаксации. Однако, совпадение распределений энергий адсорбции и различие времен ядерной магнитной релаксации ( $T_1$ ) адсорбированного  $^3\text{He}$  в двух аэрогелях более чем на порядок не позволяют однозначно говорить о связи ядерной магнитной релаксации  $^3\text{He}$  с неоднородностью потенциала адсорбции на поверхности аэрогелей. Возможно, важным фактором, влияющим на ядерную магнитную релаксацию  $^3\text{He}$ , не упоминавшимся ранее,

является различное пространственное распределение глубоких потенциальных ям адсорбции в различных типах аэрогелей.

В **заключении** приводятся основные результаты работы:

- Экспериментально установлено, что ядерная магнитная релаксация жидкого и газообразного  $^3\text{He}$  в аэрогелях при температурах 1,5–4,2 К происходит через адсорбированный слой с энергиями адсорбции в нем более 60 К.
- Предложена модель релаксации в адсорбированном слое  $^3\text{He}$  в нитевидном аэрогеле, позволяющая качественно объяснить частотную зависимость времени релаксации  $T_1$  ядер  $^3\text{He}$ . Термостатом для ядерной магнитной релаксации  $^3\text{He}$  является энергетический резервуар движений атомов  $^3\text{He}$  в неоднородном потенциале адсорбции в аэрогеле.
- Предложена ЯМР методика исследования процессов установления термодинамического равновесия в адсорбированных слоях  $^3\text{He}$  в высокопористых средах, в которой наряду с измерением времен релаксации  $T_1$ ,  $T_2$ , амплитуды сигнала ЯМР  $^3\text{He}$  измеряются их зависимости от времени после начала конденсации.
- Обнаружены эффекты метастабильных состояний у адсорбированных слоев  $^3\text{He}$  малой плотности на поверхности аэрогелей, проявляющиеся в наличии зависимостей времен  $T_1$  и  $T_2$  ядер  $^3\text{He}$  от условий заполнения поверхности (температуры). Данные эффекты отсутствуют в полностью заполненных адсорбированных слоях.
- Термодинамическими методами (с помощью измерения давления и температуры) определены средние значения и распределения энергий адсорбции атомов  $^3\text{He}$  в двух типах аэрогелей. Полученные распределения совпадают в пределах погрешности и описываются убывающей экспоненциальной функцией со средней энергией адсорбции  $130 \pm 11$  К для нитевидного и  $136 \pm 12$  К для порошкообразного аэрогелей. Вопрос о пространственном распределении неоднородного потенциала адсорбции в аэрогелях остается открытым.



## Публикации автора по теме диссертации

Статьи в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Klochkov, A. V. Nuclear magnetic relaxation of  $^3\text{He}$  in contact with an aerogel above the Fermi temperature / A.V. Klochkov, **V.V. Kuzmin**, K.R. Safiullin, M. S. Tagirov, D. A. Tayurskii, N. Mulders // JETP lett. - 2008. - V.88. - p.823-827.
2. Klochkov, A. Pulse NMR of  $^3\text{He}$  in aerogel at temperature 1.5K / A. Klochkov, **V. Kuzmin**, K. Safiullin, M. Tagirov, A. Yudin, N. Mulders// Journal of Physics: CS.- 2009.- vol. 150.- p.032043.
3. Alakshin, E.M. On the thermodynamic equilibrium in the  $^3\text{He}$ -aerogel system at low temperatures / E. M. Alakshin, R. R. Gazizulin, A. V. Klochkov, **V. V. Kuzmin**, N. Mulders, M. S. Tagirov and D. A. Tayurskii // JETP lett. - 2011. - V.93. - N.4. - p.223-225.

Статьи в других научных журналах:

4. Alakshin, E.M. Heterogeneous adsorption potential of  $^3\text{He}$  in silica aerogel and its influence on magnetic relaxation of  $^3\text{He}$  / E.M. Alakshin, R.R. Gazizulin, A.V. Klochkov, **V.V. Kuzmin**, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii // arXiv:condmat. - 2010. - v.1012. - p.2461. - <http://arxiv.org/abs/1012.2461>
5. Alakshin, E.M. Thermalization of the system " $^3\text{He}$ -aerogel" at 1.5 K / E.M. Alakshin, R.R. Gazizulin, A.V. Klochkov, **V.V. Kuzmin**, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii, N. Mulders // arXiv:condmat. - 2010. - v.1012. - p.2309. - <http://arxiv.org/abs/1012.2309>

Тезисы докладов на научных конференциях:

1. Kuzmin, V.V. Nuclear Spin-kinetics of  $^3\text{He}$  in Magnetic Aerogel / **V.V. Kuzmin**, K.R. Safiullin, A.V. Klochkov, R.R. Gazizulin, A.A. Rodionov, G.V. Mamin, D.A. Tayurskii, N. Mulders, M.S. Tagirov// XI International Youth Scientific School "Actual problems of magn. resonance and its application", Kazan, Russia, 2007, p.42-43.
2. Kuzmin, V. V. Nuclear Spin-Kinetics of  $^3\text{He}$  in Magnetic Aerogel / **V.V. Kuzmin**, K.R. Safiullin, A.V. Klochkov, R.R. Gazizulin, A.A. Rodionov, G.V. Mamin, D.A.

- Tayurskii, N. Mulders, M.S. Tagirov // International Symposium on Quantum Fluids and Solids (01.08.2007-06.08.2007) Kazan, Russia, 2007, Abstracts. p.131.
3. Kuzmin, V. V. NMR  $T_1$  Measurements of Liquid  $^3\text{He}$  in Magnetic Aerogel / **V.V. Kuzmin**, K.R. Safiullin, A.V. Klochkov, R.R. Gazizulin, A.A. Rodionov, G.V. Mamin, D.A. Tayurskii, N. Mulders, M.S. Tagirov // Magnetic Resonance for the Future "EUROMAR 2008" (04.07.2008-05.07.2008), Abstracts. P.241.
  4. Kuzmin, V. Pulse NMR of  $^3\text{He}$  in aerogel at temperature 1.5K / A. Klochkov, **V. Kuzmin**, K. Safiullin, M. Tagirov, A. Yudin, N. Mulders // 25th international conference on low temperature physics (06.08.2008-13.08.2008) Amsterdam, Netherlands, 2008, p. 217.
  5. Tayurskii, D.A. Pulse NMR of  $^3\text{He}$  in bulk and powder aerogel / D. A. Tayurskii, A. V. Klochkov, **V. V. Kuzmin**, R. R. Gazizulin, M. S. Tagirov, and N. Mulders // International Symposium on Quantum Fluids and Solids. August 5-11, 2009 - Northwestern University, Evanston, Illinois, USA. Book of Abstracts. P-EFG-49.
  6. Тагиров, М.С. Импульсный ЯМР  $^3\text{He}$  в контакте с порошковым аэрогелем [текст] / М.С. Тагиров, Д.А. Таюрский, А.В. Ключков, **В.В. Кузьмин**, Р.Р. Газизулин // XXXV Собрание по физике низких температур (НТ-35), 29 сентября - 02 октября 2009, Черногоровка, Тезисы докладов. - 2009. - С. 35-36.
  7. Tagirov, M.S. The study of the system "aerogel-He-3" by radiospectroscopy methods / M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii, A.V. Klochkov, **V.V. Kuzmin**, A.A. Rodionov, G.V. Mamin, E.M. Alakshin, R.R. Gazizulin, K. Kono, A. Nakao, and N. Mulders // "QFS2010 International Symposium on Quantum Fluids and Solids" book of abstracts. - Grenoble, France, August 1-7 2010. - p.152.
  8. Klochkov, A.V. Thermalization of the system " $^3\text{He}$ -Aerogel" at low temperatures / A.V. Klochkov, **V.V. Kuzmin**, R.R. Gazizulin, E.M. Alakshin, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii, N. Mulders // XIII International Youth Scientific School "Actual problems of magnetic resonance and its application", Proceedings. - Kazan, 4-8 October 2010. - Казань, 2010. - pp.172-174.
  9. Alakshin, E.M. Low temperature adsorption of  $^3\text{He}$  on silica aerogel surface and its influence on  $^3\text{He}$  spin kinetics / E.M. Alakshin, R.R. Gazizulin, A.V. Klochkov, **V.V. Kuzmin**, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii, N. Mulders // XIV International Youth

Scientific School "Actual problems of magnetic resonance and its application",  
Proceedings, pp.10-13, Kazan, 20-25 June 2011.

10. Klochkov, A.V. Spin kinetics of  $^3\text{He}$  in porous media / A.V. Klochkov, E.M. Alakshin, R.R. Gazizulin, **V.V. Kuzmin**, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii // International conference Resonances in condensed matter devoted to centenary of Professor S.A. Altshuler, book of abstracts, p.36, Kazan, 21-25 June 2011.